

**А.В. ГЛАДКИЙ, Е.С. ПОДЛАСОВ**

## **ОБ АВТОМАТИЗАЦИИ РАСЧЕТОВ АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В НЕОДНОРОДНЫХ ВОЛНОВОДАХ**

**Abstract:** *The task of automatization of solving the hydroacoustic problems connected with calculation of the acoustic fields in non-homogeneous waveguides automation is considered. The mathematical models of the wave processes spreading in the form of differential equations with partial derivatives are presented. The software for solving these problems using methods of normal modes, ray approximation and parabolic equation is described.*

**Key words:** *acoustic field, mathematical model, boundary value problem, numerical method, software-algorithmic complex.*

**Анотація:** *Розглядається проблема автоматизації розв'язання задач підводної акустики, пов'язаних з обчисленням акустичних полів у неоднорідних хвильоводах. Наводяться математичні моделі поширення хвильових процесів у вигляді диференціальних рівнянь із частковими похідними. Описано програмно-алгоритмічний комплекс математичного моделювання акустичних полів за допомогою методів нормальних мод, променевого наближення та параболічного рівняння.*

**Ключові слова:** *акустична хвиля, математична модель, крайова задача, числовий метод, програмно-алгоритмічний комплекс.*

**Аннотация:** *Рассматривается проблема автоматизации решения задач подводной акустики, связанных с вычислением акустических полей в неоднородных волноводах. Приводятся математические модели распространения волновых процессов в виде дифференциальных уравнений с частными производными. Описывается программно-алгоритмический комплекс математического моделирования акустических полей с помощью методов нормальных мод, лучевого приближения и параболического уравнения.*

**Ключевые слова:** *акустическая волна, математическая модель, краевая задача, численный метод, программно-алгоритмический комплекс.*

### **1. Введение**

Интенсивные исследования процессов распространения акустических волн в двумерных и трехмерных подводных неоднородных волноводах получили значительный импульс, начиная с 80-х годов прошлого столетия в связи с потребностями дистанционного зондирования и акустического мониторинга регионов Мирового океана. Практически во всех видах сигнализации, связи, локации, дистанционного исследования водных масс и дна океана используются звуковые волны. Результаты моделирования волновых процессов применяются также при проектировании современных информационно-измерительных систем, позволяют решить широкий круг взаимосвязанных задач, таких как формирование заданных структур акустических полей в волноводах, синтез гидроакустических антенн и др. Поэтому актуальными являются проблемы создания и усовершенствования математических моделей процесса распространения звука в океане, а также разработки специализированного программного обеспечения.

В настоящее время разработано большое количество численно-аналитических методов и вычислительных алгоритмов для решения волновых задач [1–9]. Вопросы создания компьютерных моделей, ориентированных на решение определенных классов задач, а также многофункциональных программных комплексов, описаны в [10–12].

В данной статье рассматривается задача создания автоматизированной вычислительной системы, объединяющей различные подходы к моделированию гидроакустических процессов. В качестве основы используются математические модели в виде дифференциальных уравнений с частными производными.

## 2. Математические модели волновых процессов

С математической точки зрения распространение гармонических акустических волн описывается краевыми задачами для уравнения Гельмгольца с комплексным несамосопряженным оператором. В настоящее время для компьютерного моделирования акустических полей в подводных неоднородных волноводах используются три класса математических моделей в виде краевых (начально-краевых) задач для эллиптических (параболических типа Шредингера) волновых уравнений:

- краевые задачи для эллиптического волнового уравнения Гельмгольца с комплекснозначным несамосопряженным оператором;
- задача Коши для эллиптического преобразованного волнового уравнения Гельмгольца;
- начально-краевые задачи для параболических волновых уравнений типа Шредингера с комплекснозначным несамосопряженным оператором.

Для неоднородной среды акустическое поле точечного гармонического источника (зависимость от времени принимается в виде  $e^{-i\omega t}$ ) в декартовой системе координат  $(x, y, z)$  описывается уравнением Гельмгольца [1,3]

$$\rho(\mathbf{x}) \operatorname{div} \left( \frac{1}{\rho(\mathbf{x})} \operatorname{grad} p \right) + k_0^2 (n^2(\mathbf{x}) + i\nu(\mathbf{x})) p = -\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0), \quad (1)$$

где  $p(\mathbf{x}), \mathbf{x} = (x, y, z)$  – акустическое давление;  $k_0 = \omega / c_0$  – волновое число;  $n(\mathbf{x}) = c_0 / c(\mathbf{x}), \mathbf{x} = (x, y, z)$  – коэффициент преломления;  $c(\mathbf{x})$  – скорость звука ( $c_0$  – скорость звука в некоторой точке);  $\rho(\mathbf{x})$  – плотность среды;  $\nu(\mathbf{x}) \geq 0$  – коэффициент затухания;  $\mathbf{x}_0 = (x_0, y_0, z_0)$  – координаты источника;  $\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)$  – дельта-функция Дирака;  $i = \sqrt{-1}$  – мнимая единица.

В цилиндрической системе координат  $(r, \varphi, z)$  уравнение (1) принимает вид

$$\begin{aligned} \frac{\rho}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{r}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{\rho}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \varphi} \right) + \rho \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \right) + k_0^2 n^2(r, \varphi, z) + i\nu(r, \varphi, z) p = \\ = -\frac{\delta(r)}{2\pi r} \delta(z - z_0). \end{aligned} \quad (2)$$

При моделировании волновых задач широко используют математические модели мягкой, жесткой и импедансной границ волноводов. Импедансные условия содержат комплексные коэффициенты и описывают потери акустической энергии. В неоднородной по плотности среде на границе раздела сред выполняются условия непрерывности акустического давления и потока. Кроме того, для корректной постановки краевых задач в неограниченных областях на бесконечности необходимо задать соответствующие условия излучения, обеспечивающие единственность решения. В общем случае пространства  $R^n$  для решения уравнения Гельмгольца в средах без затухания ( $\nu(\mathbf{x}) = 0, n(\mathbf{x}) = 1$ ) должны выполняться условия излучения Зоммерфельда

$$p(\mathbf{x}) = O\left(r^{(1-n)/2}\right), \frac{\partial p}{\partial r} \mp ik_0 p = o\left(r^{(1-n)/2}\right), \mathbf{x} = (x, y, z), r = |\mathbf{x}| \rightarrow \infty,$$

где знаки “ $\mp$ ” соответствуют зависимости во времени  $e^{\mp i\omega t}$ .

Для моделирования акустических полей в азимутально-симметричном слоисто-неоднородном волноводе с конечной (бесконечной) глубиной и акустическими параметрами, зависящими от вертикальной координаты, эффективно применяется метод нормальных мод. В этом случае акустическое давление удовлетворяет волновому уравнению Гельмгольца

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \rho \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \right) + k_0^2 \left( n^2(z) + iv(z) \right) p = -\frac{\delta(r)}{2\pi r} \delta(z - z_0) \quad (3)$$

и может быть представлено в виде

$$p(r, z) = \frac{i}{4\rho(z_0)} \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_n(z_0) \Phi_n(z) H_0^{(1)}(\xi_n r) / \gamma_n^2,$$

где  $H_0^{(1)}(\cdot)$  – функция Ханкеля нулевого порядка первого рода, а  $\Phi_n(z), \xi_n$  – решение вспомогательной спектральной задачи

$$\rho \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) + k^2(z) \Phi = \xi^2 \Phi, 0 < z < H < \infty, \text{Im } k^2(z) > 0, \quad (4)$$

$$\Phi(0) = 0, \frac{d\Phi(H)}{dz} + \alpha \Phi(H) = 0, \text{Im } \alpha \leq 0, \text{Re } \alpha \geq 0. \quad (5)$$

Другой класс математических моделей лежит в основе расчета дальнего низкочастотного акустического поля в азимутально-симметричной среде (при  $k_0 r \gg 1$ ) с учетом прямых и обратных волн. Эти модели базируются на представлении решения уравнения Гельмгольца в виде  $p(r, z) = H_0^{(1)}(k_0 r) u(r, z)$ , где достаточно плавная амплитуда  $u(r, z)$  удовлетворяет преобразованному волновому уравнению [3,7]

$$2ik_0 \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + k_0^2 (n^2(r, z) - 1 + iv) u = 0. \quad (6)$$

Важным результатом такого преобразования является понижение размерности области на единицу, поскольку координата вдоль оси распространения волн играет роль “времени”. В этой связи значительный интерес представляет разработка численных методов для решения некорректной по Адамару задачи Коши для уравнения (6) с соответствующими краевыми условиями.

Одним из наиболее перспективных методов математического моделирования акустических полей является метод параболического уравнения [2, 3, 7–10], который базируется на решении начально-краевых задач для параболических волновых уравнений типа Шредингера, аппроксимирующих уравнение Гельмгольца. Такой подход используется для моделирования, в основном, однонаправленных волновых процессов.

Параболические приближения волнового уравнения Гельмгольца также основаны на представлении решения в виде  $p(r, z) = H_0^{(1)}(k_0 r)u(r, z)$ , где амплитуда  $u(r, z)$  удовлетворяет псевдодифференциальному уравнению

$$\frac{\partial u}{\partial r} + ik_0 u - ik_0 \left( E + (n^2(r, z) - 1 + i\nu)E + \frac{1}{k_0^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)^{1/2} u = 0, \quad (7)$$

которое содержит оператор корня квадратного.

Конкретные дифференциальные уравнения могут быть получены с помощью тейлоровской, рациональной или аппроксимации Паде оператора корня квадратного в уравнении (7), в том числе:

- приближение для малых углов распространения акустической энергии

$$2ik_0 \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + k_0^2 (n^2(r, z) - 1 + i\nu(r, z))u = 0; \quad (8)$$

- приближение для малых углов и быстроизменяющегося коэффициента преломления

$$2ik_0 \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{n(r, z)} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + 2k_0^2 (n(r, z) - 1 + i\nu(r, z) + \mu(r, z))u = 0, \quad (9)$$

$$\mu(r, z) = \mu(k_0, n, n_z, n_{zz});$$

- дробно-рациональное приближение оператора корня квадратного

$$\left( E + \frac{1}{4} (n^2(r, z) - 1)E + \frac{1}{4k_0^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{ik_0}{2} \left( (n^2(r, z) - 1)E + \frac{1}{k_0^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) u; \quad (10)$$

- приближение для широких углов (аппроксимация Паде).

$$\sqrt{E + L} \approx E + \sum_{k=1}^n \frac{a_k L}{1 + b_k L}, \quad L = (n^2(r, z) - 1 + i\nu)E + \frac{1}{k_0^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (11)$$

Принципиальным моментом численного моделирования акустических процессов является разработка и исследование корректности разностных схем для эллиптических (параболических типа Шредингера) волновых уравнений с комплекснозначным несамосопряженным оператором.

При моделировании высокочастотных полей высокую эффективность показал метод лучевого приближения [1, 2, 11, 12]. В рамках этого метода решение уравнения Гельмгольца представляют в виде суммы ряда по обратным степеням волнового числа:

$$p(\mathbf{x}) = \exp(ik_0 \Psi(\mathbf{x})) \sum_{m=0}^{\infty} (ik_0)^{-m} A_m(\mathbf{x}), \quad (12)$$

ограничиваясь одним или несколькими членами разложения. Фазовая функция  $\Psi(\mathbf{x})$  в (12) удовлетворяет уравнению эйконала:

$$(\nabla \Psi)^2 = n^2(\mathbf{x}), \quad (13)$$

а амплитуда  $A_m(\mathbf{x})$  – уравнению переноса:

$$2\nabla \Psi \cdot \nabla A_m + A_m \Delta \Psi = -\Delta A_{m-1}, \quad m = 0, 1, 2, \dots, A_{-1} = 0, \quad (14)$$

где  $\nabla$  – оператор градиента,  $\Delta$  – оператор Лапласа.

Решение уравнения (13) можно получить путем введения волнового фронта (поверхности уровня фазы  $\Psi$ ) и семейства кривых (лучей), ортогональных фронту волны. Если  $\mathbf{x} = \mathbf{x}(s)$  – уравнение луча, где  $s$  – длина дуги, то траектория луча удовлетворяет векторному лучевому уравнению

$$\frac{d}{ds} \left( n \frac{d\mathbf{x}}{ds} \right) = \nabla n. \quad (15)$$

Для определения единственного решения уравнения (15) необходимо задать начальные условия:

$$\mathbf{x}|_{s=s_0} = \mathbf{x}_0, \quad \left. \frac{d\mathbf{x}}{ds} \right|_{s=s_0} = \mathbf{t},$$

где  $\mathbf{t}$  – некоторый единичный вектор, выходящий из заданной точки  $s_0$ .

При известной траектории луча фазовая функция определяется уравнением

$$\frac{d\Psi}{ds} = n. \quad (16)$$

Интегрируя (16) вдоль луча от точки  $s_0$  до  $s$ , приходим к следующему выражению для эйконала:

$$\Psi(s) = \Psi(s_0) + \int_{s_0}^s n(\mathbf{x}(s')) ds'.$$

Соответственно, уравнение переноса (14) вдоль луча принимает вид

$$2n \frac{dA_m}{ds} + A_m \Delta \Psi = -\Delta A_{m-1}, \quad m = 0, 1, 2, \dots, \quad A_{-1} = 0. \quad (17)$$

Для нахождения амплитуд  $A_m$  вводят двухпараметрическое семейство лучей  $\mathbf{x} = \mathbf{x}(\xi, \eta, s)$ , где координаты  $\xi, \eta$  определяют положение точки на поверхности фронта, а параметр  $s$  характеризует точку на фиксированном луче. Выражая значение  $\Delta \Psi$  через

$J(\xi, \eta, s) = \frac{\partial(x, y, z)}{\partial(\xi, \eta, s)}$  – якобиан преобразования от лучевых координат к декартовым, уравнение

(17) можно переписать таким образом:

$$\frac{d}{ds} \left( A_m \sqrt{n(s)J(s)} \right) = -\frac{1}{2} \sqrt{n(s)J(s)} \frac{1}{n(s)} \Delta A_{m-1}, \quad m = 0, 1, 2, \dots, \quad A_{-1} = 0.$$

Отсюда, в частности, для амплитуды  $A_0$  получаем выражение

$$A_0(\xi, \eta, s) = A_0(\xi, \eta, s_0) \left| \frac{n(\xi, \eta, s_0)J(\xi, \eta, s_0)}{n(\xi, \eta, s)J(\xi, \eta, s)} \right|^{1/2}.$$

Таким образом, задача вычисления звукового поля лучевым методом сводится к решению лучевого уравнения (15) с учетом эффектов отражения лучей на границах и последующему интегрированию вдоль лучей уравнений (16), (17). Алгоритм метода состоит из следующих этапов:

– определение всех лучей, приходящих в данную точку поля  $\mathbf{x}$  из точки расположения источника  $\mathbf{x}_0$ . Сюда входят: прямой луч, лучи, однократно и многократно рефрагировавшие в волноводе, и лучи, отраженные любое число раз от поверхности или дна;

– вычисление фазы  $\Psi^{(j)}(\mathbf{x})$  вдоль  $j$ -го луча, приходящего из  $\mathbf{x}_0$  в  $\mathbf{x}$ ;

– вычисление амплитуды поля  $A_m^{(j)}(\mathbf{x})$  на  $j$ -м луче в точке  $\mathbf{x}$ ;

– суммирование всех лучей, проходящих через  $\mathbf{x}$ :

$$p(\mathbf{x}) = \sum_j \left[ \sum_m (ik_0)^{-m} A_m^{(j)}(\mathbf{x}) \right] \exp(ik_0 \Psi^{(j)}(\mathbf{x})).$$

Следует отметить, что в нулевом приближении ( $m = 0$ ) акустическое давление может быть определено, используя только данные о траектории лучей, с помощью понятия лучевой трубки [13], или с помощью траекторно-лучевых алгоритмов [14, 15].

Математические модели в виде дифференциальных уравнений (1)–(3), (6)–(11), (13),(14) позволяют решать следующие классы волновых задач подводной акустики:

– вычисление акустического поля точечных, локальных, распределенных, объемных и поверхностных излучателей в регулярных двумерных (трехмерных) слоистых волноводах, цилиндрических трехмерных волноводах со сложным нормальным сечением, заполненных неоднородной средой;

– расчет акустического поля в двумерных (трехмерных) нерегулярных волноводах с учетом изменения гидрологии по трассе, рельефа дна, влияния переменных потерь (рассеивания) в среде и на границах;

– обратные волновые задачи в регулярных и нерегулярных волноводах, состоящие в определении свойств среды, границ и месторасположения различных источников звука;

– оптимизационные задачи, связанные с определением заданных структур волновых полей, характеристик антенных систем;

– моделирование функционирования акустических систем наблюдения за подводной обстановкой, систем морской сейсмической разведки и интерпретации сейсмологических данных.

### 3. Программно-алгоритмический комплекс

Для проведения научно-технических расчетов, связанных с вычислением акустического поля в океане, разработан программно-алгоритмический комплекс. Комплекс работает на компьютерах под управлением операционных систем семейства Windows (95/98/Me/2000/XP). Для разработки были использованы интегрированная среда Borland Delphi 7 и система автоматизации математических расчетов MATLAB 7.0.1. При разработке в основу положены ряд принципов, необходимых для обеспечения высокой эффективности программного обеспечения:

– полнота классов научно-практических задач, математических моделей и алгоритмов;

– возможность автоматического выбора наилучшей модели, исходя из имеющейся информации о задаче;

– модульная структура, обеспечивающая гибкость и возможность модификации комплекса с целью дальнейшего расширения круга решаемых задач или усовершенствования уже реализованных алгоритмов;

– поддержка возможностей визуализации и интерактивного диалога с пользователем, которые позволяют обеспечить пользователю максимальную свободу в процессе постановки задачи, проведения расчетов и анализа полученных результатов;

– возможность взаимодействия с базами гидрологических данных;

– наличие внешних интерфейсов, позволяющих проводить обмен данными с другими приложениями и использовать комплекс как сервер СОМ-автоматизации;

– поддержка механизма сценариев (скриптов), журнализации и автоматического генерирования отчетов.

Функциональная структура программно-алгоритмического комплекса представлена на рис. 1. Основным компонентом является ядро, которое реализует поддержку механизмов, обеспечивающих работу системы. Такими механизмами являются отправка и обработка сообщений, выполнение встроенных функций и функций, предоставляемых модулями расширения. Кроме того, ядро производит первоначальную загрузку и инициализацию комплекса, обеспечивает взаимодействие с операционной системой и реестром Windows, осуществляет выполнение скриптов и предоставляет внешним приложениям интерфейсы автоматизации.

Функциональность комплекса, связанная с процессом решения задач, обеспечивается модулями расширения. Физически каждый модуль расширения представляет собой одну или несколько динамически компоуемых библиотек (DLL), содержащих вычислительные средства модуля, а также файл с расширением .fms, несущий дополнительную информацию, в частности, необходимую для генерирования графического пользовательского интерфейса модуля. Кроме того, в состав комплекса также входят вспомогательные модули, предназначенные для проведения промежуточных расчетов. Эти модули используются модулями расширения и не имеют собственного пользовательского интерфейса. Взаимодействие модулей расширения и вспомогательных модулей с ядром комплекса осуществляется с помощью загрузчика модулей расширения.



Вспомогательный модуль stliuv позволяет находить решение самосопряженной (несамосопряженной в случае наличия поглощения) спектральной задачи Штурма-Лиувилля (4), (5). Данный модуль используется для расчета акустического поля методом нормальных мод в азимутально-симметричном слоисто-

Рис. 1. Функциональная структура комплекса неоднородном волноводе с конечной (бесконечной) глубиной и акустическими параметрами, зависящими от вертикальной координаты. Основой алгоритмического обеспечения являются численно-аналитические, а также традиционные или учитывающие асимптотическую коррекцию (сильно осциллирующее решение) разностные методы [3, 16, 17]. С целью повышения точности решения спектральной задачи предусмотрена возможность уточнения собственных значений,

используя процедуру Ричардсона. Входными данными модуля являются данные, необходимые для моделирования акустического поля: тип, структура и глубина волновода; математическая модель дна волновода с конечной глубиной (мягкая, жесткая, импедансная граница); скорость звука, плотность среды и коэффициент затухания, заданные в аналитическом или дискретном виде. В соответствии с математической моделью волновода данные о скорости звука, плотности среды, коэффициенте затухания могут быть заданы в виде непрерывных, кусочно-непрерывных или кусочно-постоянных функций.

Модуль расширения `normmodes` предназначен для расчета методом нормальных мод широкого класса волновых процессов, описываемых уравнением Гельмгольца (3) в однородных и неоднородных осесимметричных волноводах с конечной (бесконечной) глубиной и акустическими параметрами, зависящими от вертикальной координаты. Входными данными модуля являются данные, определяющие тип и структуру волновода, в том числе скорость звука, плотность среды и коэффициент затухания, заданные в аналитическом или дискретном виде, данные о частоте, глубине и дне волновода, критерий количества учитываемых при вычислении поля мод. Предусмотрена возможность учета эффектов потерь акустической энергии в водной среде, дне и на границах волновода; использования различных функциональных зависимостей скорости звука, плотности среды, коэффициента затухания в виде непрерывных, кусочно-непрерывных, кусочно-постоянных (постоянных) функций; граничных условий на нижней границе волновода с конечной глубиной (мягкая, жесткая, импедансная граница). В процессе работы модуль `normmodes` использует вспомогательный модуль `stliuv` для решения соответствующей спектральной задачи Штурма-Лиувилля (3), (4). Акустическое поле вычисляется в точках либо заданной пользователем произвольной сетки, либо равномерной прямоугольной сетки с заданным пользователем шагом по дистанции и глубине. Выходными данными являются значения интенсивности акустического поля в заданной области, а также вспомогательные данные в виде собственных чисел и собственных функций волноводной задачи Штурма-Лиувилля (4), (5).

В модуле расширения `ragab` реализована методика расчета дальнего акустического поля в двумерных и трехмерных средах с переменными по трассе акустическими параметрами, использующая преобразование волнового уравнения Гельмгольца с последующим применением разностного метода решения задачи Коши для аппроксимационных уравнений (6)–(10). Эллиптическое уравнение (6) учитывает прямые и обратные волны, параболические аппроксимации (8)–(10) предназначены для расчета однонаправленных процессов. В случае уравнения (6) используемые явные (неявные) разностные схемы являются условно устойчивыми, что обусловлено некорректностью дифференциальной задачи. В модуле реализованы явные (неявные) разностные схемы для численного моделирования звукового поля в осесимметричных волноводах с конечной глубиной для различных моделей дна [3, 7–9].

Вспомогательный модуль `raytrace` предназначен для построения траектории луча, а также вычисления амплитуды и фазы на луче путем интегрирования дифференциальных уравнений (15), (17). Модуль используется для решения задач вычисления акустического поля в трехмерно-неоднородном океане переменной глубины с помощью алгоритмов, основанных на методе лучевого приближения. В качестве входных в модуль вводятся следующие данные: тип и структура



волновода, математическая модель дна (уравнение поверхности раздела вода-дно, граничные условия, профиль коэффициента отражения), пространственная зависимость скорости звука, заданная в аналитическом или дискретном виде, начальные условия для уравнений (15), (17), а также параметры численного интегрирования. Выходными данными являются траектория луча и определенные на ней значения фазы и амплитуды. В общем случае интегрирование уравнений (15), (17) осуществляется с помощью численных методов, в частности, методов Рунге-Кутты. В случае слоисто-неоднородной среды траектория луча, значения амплитуды и фазы выражаются в аналитическом виде.

Модуль расширения *gaucoust* служит для моделирования акустического поля в трехмерно-неоднородном океане переменной глубины методом лучевого приближения и содержит средства визуализации результатов вычислений в виде лучевой картины. Амплитуда поля может быть определена либо путем интегрирования дифференциального уравнения (17), либо из геометрических соображений с использованием понятия лучевой трубки. Кроме того, имеется возможность расчета усредненного поля с помощью траекторно-лучевых алгоритмов. Входные

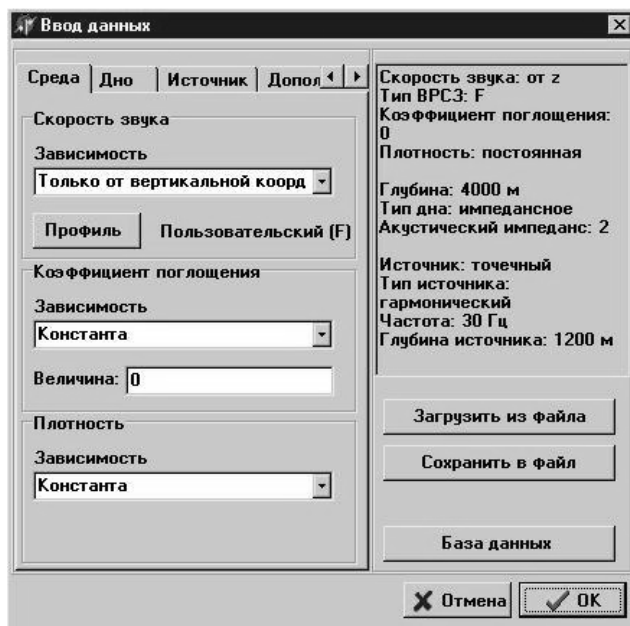


Рис. 2. Интерфейс модуля ввода данных

данные модуля включают в себя данные о пространственном распределении скорости звука и коэффициента затухания, функцию, описывающую рельеф дна океана, параметры, определяющие акустические свойства дна, а также информацию об источнике. Функциональные зависимости акустических параметров могут быть заданы в аналитическом или дискретном виде. Выходными данными модуля являются лучевая картина и значения интенсивности акустического поля в заданной пользователем области. Область может быть задана в виде равномерной или неравномерной трехмерной (в случае

азимутально-симметричной среды – двумерной) сетки.

Остальные программные компоненты предназначены для обеспечения взаимодействия комплекса с пользователем и поддержки дополнительных возможностей. В состав модуля ввода данных входит набор функций и экранных форм с элементами управления, позволяющих пользователю вводить в комплекс информацию о задаче (вручную, с файла на диске или из базы гидрологических данных), а также на основании введенной информации автоматически выбирать наиболее подходящую математическую модель. Модуль визуализации и постобработки содержит средства для текстового и графического отображения результатов вычислений в виде таблицы и цветной картины с настраиваемой палитрой и линейным (логарифмическим) масштабом. Средства постобработки позволяют рассчитывать разрезы поля, а также определять зоны обнаружения

акустической системы с заданным порогом чувствительности. По результатам вычислительного эксперимента может быть сгенерирован отчет.

Вычислительный эксперимент состоит из следующих этапов: ввод данных о гидрологических условиях и об источнике, выбор математической модели, постановка задачи, решение, визуализация и постобработка. На этапе ввода данных (рис. 2) пользователь определяет рельеф, акустические свойства дна, характеристики водной среды (распределение скорости звука, коэффициента поглощения и плотности) и параметры источника. Затем, на основании введенной информации, пользователю предлагается выбрать математическую модель и параметры расчета, а также область, в которой вычисляется поле (рис. 3).

Результаты расчета акустического поля отображаются в текстовом и графическом виде (рис. 4). Модуль генерирования отчетов позволяет записать результаты вычислительного эксперимента в файл RTF или HTML либо вывести на печать.

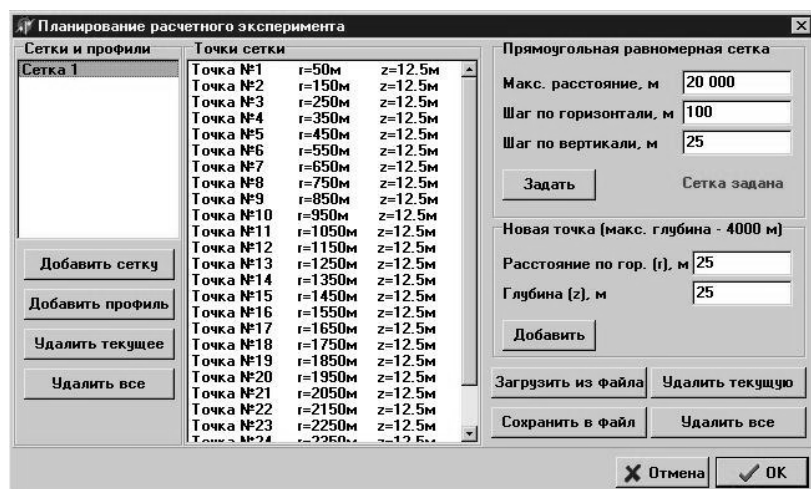


Рис. 3. Интерфейс планирования вычислительного эксперимента

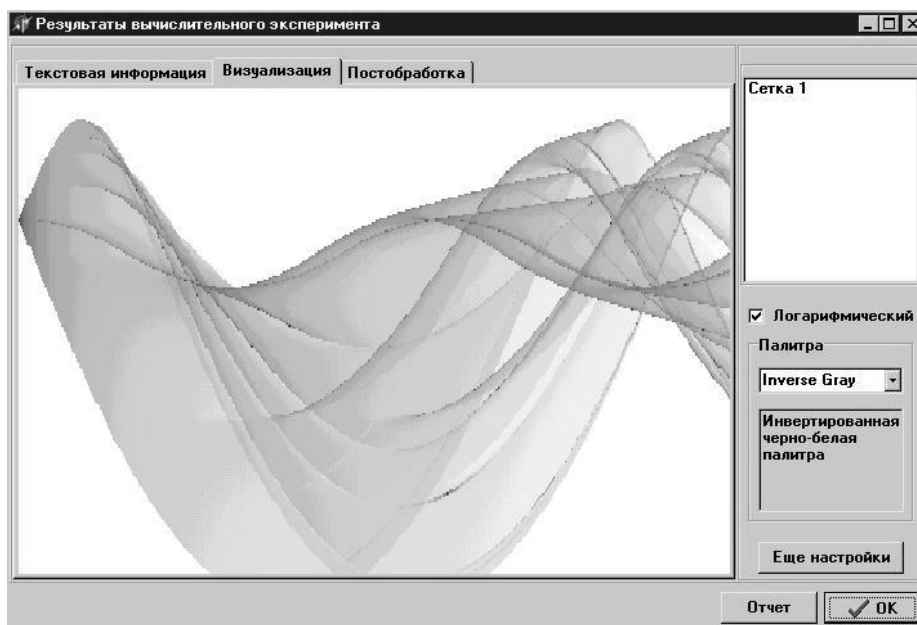


Рис. 4. Интерфейс отображения результатов

#### 4. Заключение

Описанный программный комплекс представляет собой новое средство для решения задач, связанных с моделированием процессов распространения волн в неоднородных волноводах. Проблемная ориентированность и широкий класс реализованных алгоритмов обуславливают высокую эффективность при решении вычислительных задач гидроакустики, а дружественный интерфейс и средства визуализации обеспечивают простоту работы с комплексом. За счет модульной структуры возможна адаптация программного обеспечения для решения обратных и оптимизационных задач, состоящих в определении свойств среды, источников звука, заданных структур волновых полей или характеристик антенных систем.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 264 с.
2. Распространение волн и подводная акустика / Под ред. Дж.Б. Келлера и Дж. Пападакиса. – М.: Мир, 1980. – 230 с.
3. Гладкий А.В., Сергиенко И.В., Скопецкий В.В. Численно-аналитические методы исследования волновых процессов. – К.: Наукова думка, 2001. – 452 с.
4. Гладкий А.В., Ляшко С.И., Сергиенко И.В. Оптимизационные задачи распространения звуковых волн в неоднородных средах // Доклады IX научной школы-семинара академика Л.М. Бреховских "Акустика океана", совмещенной с XII сессией Российского акустического общества. – М.: ГЕОС, 2002. – С.108–112.
5. Алексеев Г.В., Комашинская Т.С. Об активной минимизации потенциальной энергии звукового поля в двумерном многомодовом волноводе // Акуст. журнал. – 2003. – Т. 49, №2. – С. 149–155.
6. Боголюбов А.Н., Делицин А.Л., Красильникова А.В., Минаев Д.В., Свешников А.Г. Математическое моделирование волноведущих систем на основе метода конечных разностей // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 1998. – №5. – С.39–54.
7. Завадский В.Ю. Моделирование волновых процессов. – М.: Наука, 1991. – 248 с.
8. Lee D., McDaniel S.T. Ocean acoustic propagation by finite difference method // Comput. Math. Appl. – 1987. – Vol. 4. – P. 305–423.
9. Lee D., Pierse A.D., Shang E.C. Parabolic equation development in the twentieth century // J. Comput. Acoust. – 2000. – Vol.1, N 4. – P. 527–637.
10. Авилов К.В., Добряков Н.А., Попов О.Е. Комплекс программных средств для вычисления звуковых полей в морской среде, неоднородной по глубине и трассе распространения // Доклады X научной школы-семинара академика Л. М. Бреховских "Акустика океана", совмещенной с XIV сессией Российского акустического общества. – М.: ГЕОС, 2004. – С. 27–30.
11. <http://oalib.saic.com>.
12. [http://www.angelfire.com/sc/dmitrya/ocean\\_r.html](http://www.angelfire.com/sc/dmitrya/ocean_r.html).
13. Подласов Е.С. О моделировании волновых процессов в рамках лучевого приближения // Компьютерная математика. – 2005. – №1. – С. 10–16.
14. Пискарев А.Л. О расчете усредненных распределений интенсивности звуковых полей в океане // Акуст. журнал. – 1989. – Т. 35, Вып.4. – С. 724–730.
15. Abrosimov D.I. Computer simulation of low-frequency sound reverberation in the ocean // Acoustic Letters. – 1996. – Vol.19, N 12. – P. 231–236.
16. Boumenir A. Sampling and eigenvalues of non-self-adjoint Sturm-Liouville problems // SIAM J. Sci. Comput. – 2001. – Vol. 23, N 1. – P. 219–229.
17. Andrew A.L. Twenty years of asymptotic correction for eigenvalue computation // ANZIP J. – 2000. – Vol. 42, Part E. – P. 96–116.